

13
Электрические и магнитные свойства мультислойных структур на основе композита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}$

© О.В. Дунец, Ю.Е. Калинин, М.А. Каширин, А.В. Ситников

Воронежский государственный университет,
394026 Воронеж, Россия
e-mail: kalinin48@mail.ru

(Поступило в Редакцию 23 мая 2012 г.)

Исследованы концентрационные зависимости удельного электрического сопротивления и комплексной магнитной проницаемости многослойных пленок на основе композита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}$ от толщины различных металлических и полупроводниковых прослоек. Установлено, что в исследуемых гетерогенных системах при наличии сплошного слоя прослойки с удельным электрическим сопротивлением порядка $10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$ происходит переход от суперпарамагнитного состояния к ферромагнитному упорядочению.

Введение

В последние годы большой интерес проявляется к исследованиям мультислойных систем ферромагнитный металл–полупроводник, у которых наблюдается периодическое изменение магнитного взаимодействия от ферромагнитного к антиферромагнитному между металлическими слоями при изменении толщины полупроводниковой прослойки [1–3]. Физические свойства наномультислойных систем, где толщина слоев порядка нескольких нанометров, во многом определяются структурой и интерфейсными явлениями между различными фазами.

Интересные закономерности имеют и многослойные пленки из слоев супермагнитного композита с полупроводниковой прослойкой. Если толщина композиционного слоя ферромагнетик–диэлектрик составляет несколько нанометров и состав его находится до порога перколяции, то при наличии сплошного слоя полупроводниковой прослойки в многослойной системе при комнатной температуре происходит переход от супермагнитного состояния слоя к ферромагнитному упорядочению всей системы [4,5]. Для объяснения наблюдаемого упорядочения магнитных моментов гранул суперпарамагнитных слоев было предложено два возможных механизма: увеличение температуры бифуркации в многослойных структурах к температурам выше комнатной [4–5] и возникновение сильного обменного взаимодействия между изолированными ферромагнитными гранулами ферромагнетика через электроны проводимости полупроводника [6]. Какое из этих или других модельных представлений окажется предпочтительнее, покажут дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты исследования влияния прослойки из различных материалов на электрические и магнитные свойства мультислойных структур из слоев суперпарамагнитного композита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}$, состав которого находится до порога перколяции.

1. Методика эксперимента

Многослойные наноструктуры из слоев нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}$ с различными прослойками были получены методом ионно-лучевого распыления двух мишеней на вращающуюся подложку [7]. В качестве металлической компоненты в композите был использован сплав $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$, который относится к легко аморфизируемому и хорошо изученным системам. Для напыления многослойных структур композит–полупроводник (металл) использовали составную мишень и мишень из полупроводника (металла). В процессе напыления между полупроводниковой мишенью и подложкой устанавливали V-образный экран, который позволял регулировать в широком диапазоне толщину слоя в зависимости от взаимного расположения мишень–подложка. Данный прием позволил в одном технологическом цикле получения формировать слой полупроводника с непрерывно меняющейся толщиной. Серию из пяти ситалловых подложек закрепляли на подложкодержателе параллельно плоскости мишени вдоль ее длинной стороны. Непосредственно перед напылением многослойной пленки проводили ионную очистку поверхностей подложек для улучшения адгезионных свойств напыляемой структуры и подложки. Затем, исходя из выбранных параметров процесса (напряжения на источниках ионно-лучевого распыления, тока плазмы, давления аргона на каждом источнике, общего давления в камере, скорости вращения подложек и др.), осуществляли распыление двух мишеней одновременно. При прохождении подложкодержателя через позицию распыления каждой мишени осаждался определенный слой структуры, т. е. за один оборот формировались слой композита металл–диэлектрик и прослойка полупроводника или металла.

Перед напылением многослойной структуры проводили два контрольных напыления для определения толщины слоев и состава композиционной прослойки. Для оценки толщины слоев и прослоек была использована следующая методика. Перед началом напыления пленки выставляли подобранные ранее параметры процесса на-

Составы и толщины слоев исследуемых мультислойных структур (индексы после фигурных скобок соответствуют числу бислоев)

Состав пленки (цифры у квадратных скобок соответствуют числу бислоев)	Толщина прослойки, nm	Толщина композита, nm
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{SiO}_2]\}_{93}$	0.1–3.6	1.5–4.0
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Si}]\}_{94}$	0.5–4.5	2–4.8
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Si}]\}_{93}$	0.3–3	2–4.8
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Si}]\}_{93}$	0.2–2.3	2.1–4.9
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{In}_{35.5}\text{Y}_{4.2}\text{O}_{60.3}]\}_{93}$	0.1–1.4	2.2–5.1
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{In}_{35.5}\text{Y}_{4.2}\text{O}_{60.3}]\}_{47}$	0.4–3.3	2.9–6.8
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Si,C}]\}_{93}$	0.02–0.19	1.9–4.4
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Si,C}]\}_{47}$	0.04–0.36	3.7–8.5
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{C}]\}_{47}$	0.2–1.3	3.4–7.9
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{C}]\}_{46}$	0.3–1.85	2.8–6.5
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Sn}_{29}\text{Si}_{4.3}\text{O}_{66.7}]\}_{48}$	0.3–3	2.3–5.5
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Cu}]\}_{93}$	0.1–2.8	1.8–4.26
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{CuO}]\}_{54}$	0.4–2.8	2.1–4.8
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Bi}_2\text{Te}_3]\}_{93}$	0.25–2.33	2–4.7
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Bi}_2\text{Te}_3]\}_{101}$	0.12–1.19	2.5–5.9

пыления многослойной структуры (давление аргона на каждом источнике, общее давление в камере, давление в камере водорода). Осуществляли процесс распыления с выбранной мишени. Ток плазмы и напряжение на анод подавали, исходя из предполагаемых параметров получения многослойной структуры. После продолжительного, обычно несколько часов, процесса нанесения пленки на вращающиеся с заданной скоростью подложки проводили измерение толщины с различных участков полученных пленок с помощью интерферометра МИИ-4. Точки измерения толщины фиксировали относительно расположения подложки и мишени. Измеренные данные толщины пленки аппроксимировались в зависимости от расстояния до выбранного края подложки. Зная время распыления и время одного оборота карусели, мы рассчитывали толщину слоя пленки, полученную за одно прохождение подложкой зоны нанесения материала. Аналогичным образом определялась толщина прослойки второй фазы многослойной структуры. Толщины слоев корректировались изменением скорости вращения подложкодержателя и мощности, подаваемой на источники распыления, полагая скорость нанесения материала прямо пропорциональной данной величине.

В результате были получены многослойные пленки 9 различных композиций; составы полученных пленок, а также диапазоны изменения толщины в каждой из партий представлены в таблице.

Исследования электрического сопротивления проводились методом амперметра-вольтметра с помощью автоматизированного универсального измерительного комплекса с выводом экспериментальных результатов на ЭВМ. Для измерения использовали образцы специальной формы ($60 \times 3 \text{ mm}$), которые были вырезаны из ситалловых пластин перпендикулярно оси мишени, формируемой в процессе напыления. Высокочастотные магнитные свойства (действительная (μ') и мнимая (μ'') части комплексной магнитной проницаемости) изме-

рялись резонансным методом на частоте 50 МГц по методике [8].

2. Результаты исследований и их обсуждение

В ходе исследований были измерены зависимости величин удельного электрического сопротивления (ρ) и комплексной магнитной проницаемости образцов исследуемых партий различного состава от толщины немагнитных прослоек. Было выявлено, что все многослойные структуры можно разделить на две группы по изменению удельного электрического сопротивления от толщины немагнитной прослойки. К первой группе относятся гетерогенные многослойные структуры

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{In}_{35.5}\text{Y}_{4.2}\text{O}_{60.3}]\}_{47},$$

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Sn}_{29}\text{Si}_{4.3}\text{O}_{66.7}]\}_{48},$$

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{SiO}_2]\}_{93}.$$

В качестве примера на рис. 1 представлены зависимости ρ , а также действительной μ' и мнимой μ'' частей комплексной магнитной проницаемости от толщины прослойки SiO_2 для гетерогенной системы

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{SiO}_2]\}_{93}.$$

График зависимости удельного электрического сопротивления от толщины прослойки SiO_2 показывает сложную зависимость: при увеличении толщины прослойки до $h \approx 1.5 \text{ nm}$ электрическое сопротивление падает на порядок, при дальнейшем же росте толщины SiO_2 ρ растет до тех же значений. Объяснить эту зависимость можно, если предположить, что прослойка из SiO_2 представляет собой дефектную структуру с оборванными связями у кремния (которую правильнее

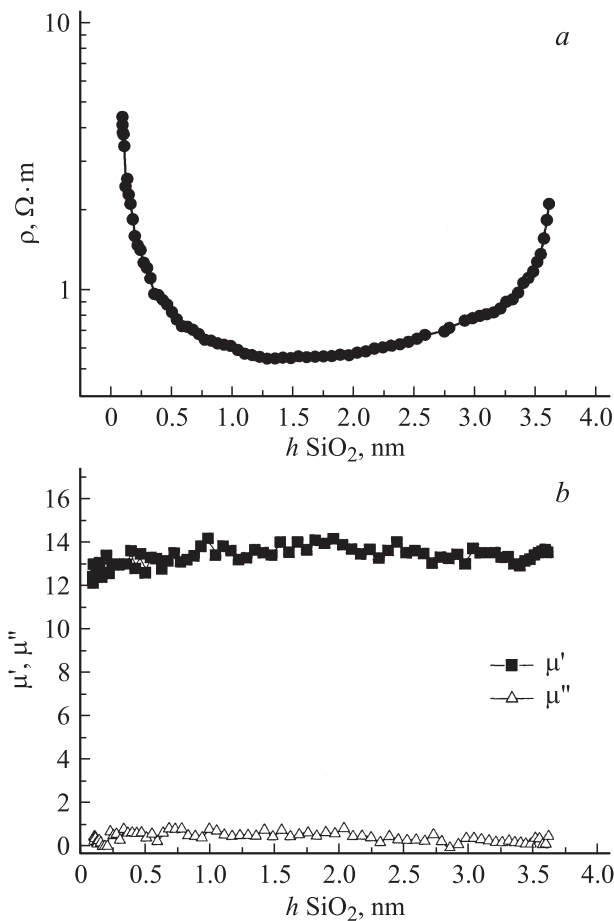


Рис. 1. Зависимости удельного электрического сопротивления ρ (a) и действительной μ' и мнимой μ'' частей комплексной магнитной проницаемости (на 50 MHz) (b) от толщины прослойки SiO_2 для $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{SiO}_2]\}_{93}$.

обозначить как SiO_n), которые, взаимодействуя с атомами металлических гранул, повышают проводимость многослойной структуры. Рост проводимости структуры будет наблюдаться до образования сплошной прослойки SiO_n . Дальнейшее увеличение толщины диэлектрика приведет к уменьшению вероятности туннелирования носителей заряда между слоями композита, при этом общее электрическое сопротивление пленки будет расти.

С другой стороны, слои композита имеют неравномерную толщину, причем эта толщина соизмерима с равновесным диаметром металлических гранул в композите $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}$ (4–5 nm). Циклическое осаждение слоя композита приводит к формированию металлических гранул, соизмеримых с толщиной слоя. Уменьшение размера металлической частицы приводит к уменьшению числа электронных состояний в грануле и увеличению разности энергий между соседними состояниями. Это уменьшает вероятность туннелирования электронов между ближайшими гранулами. Зависимость удельного электросопротивления ρ от толщины композиционного слоя h , приведенная на рис. 2, подтверждает наши предположения.

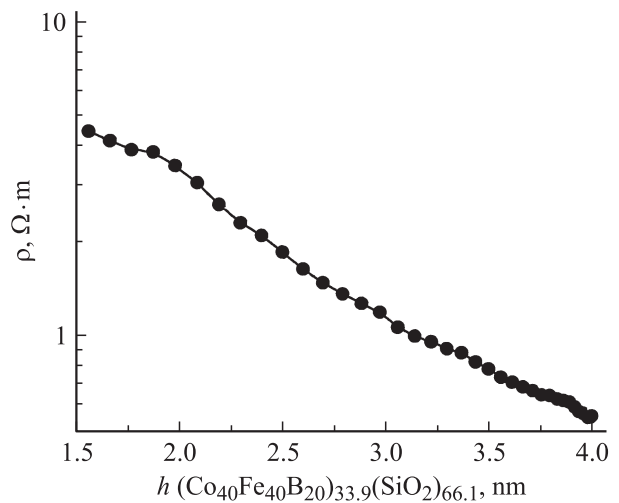


Рис. 2. Зависимость удельного электрического сопротивления ρ от толщины композиционного слоя $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}$ для $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{SiO}_2]\}_{93}$.

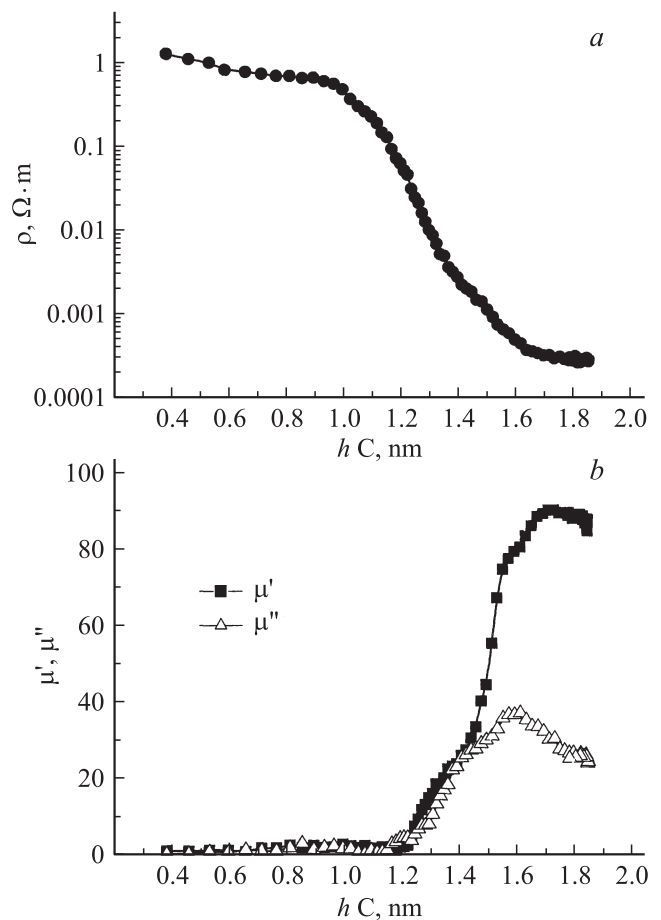


Рис. 3. Зависимость удельного электрического сопротивления ρ (a) и действительной μ' и мнимой μ'' частей комплексной магнитной проницаемости (на частоте 50 MHz) (b) от толщины прослойки C на $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{SiO}_2]\}_{93}$.

Высокое электрическое сопротивление прослоек многослойных структур этой группы приводит к тому, что величины магнитных проницаемостей μ' и μ'' в исследованных гетерогенных системах малы и не зависят от толщины прослоек (рис. 1, b). В данных структурах в исследуемом диапазоне толщин полупроводниковых прослоек не возникает магнитного упорядочения, и многослойные системы с ферромагнитными гранулами остаются в суперпарамагнитном состоянии.

Качественно другой вид зависимостей удельного электрического сопротивления, а также действительной и мнимой частей комплексной магнитной проницаемости от толщины полупроводниковой прослойки наблюдаются для систем

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Si}]\}_{94},$$

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{C}]\}_{46},$$

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Bi}_2\text{Te}_3]\}_{101}.$$

В качестве примера на рис. 3 представлены зависимости указанных параметров от толщины прослойки углерода для гетерогенной системы

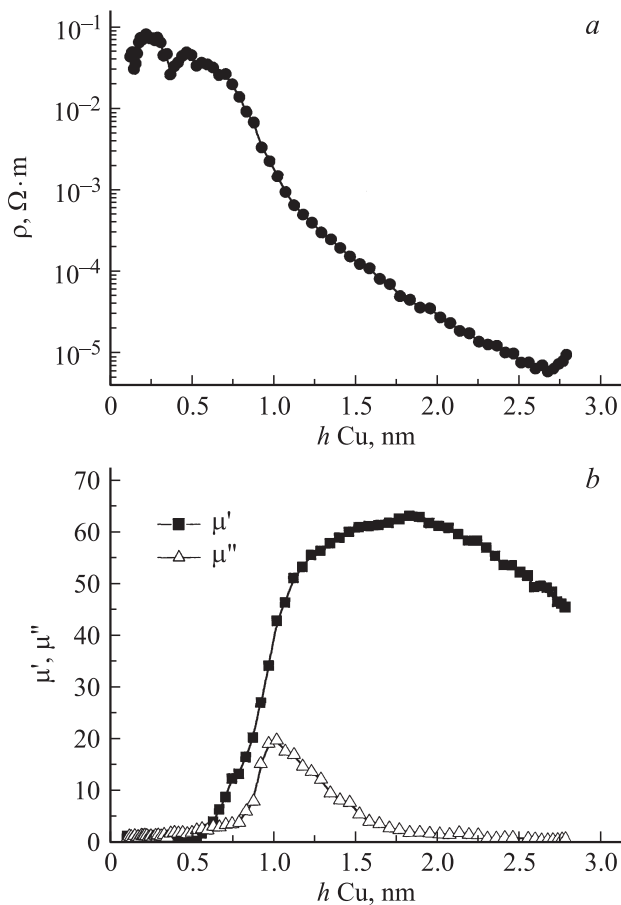


Рис. 4. Зависимости удельного электрического сопротивления ρ (a) и действительной μ' и мнимой μ'' частей комплексной магнитной проницаемости (на частоте 50 MHz) (b) от толщины прослойки Cu для $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{SiO}_2]\}_{93}$.

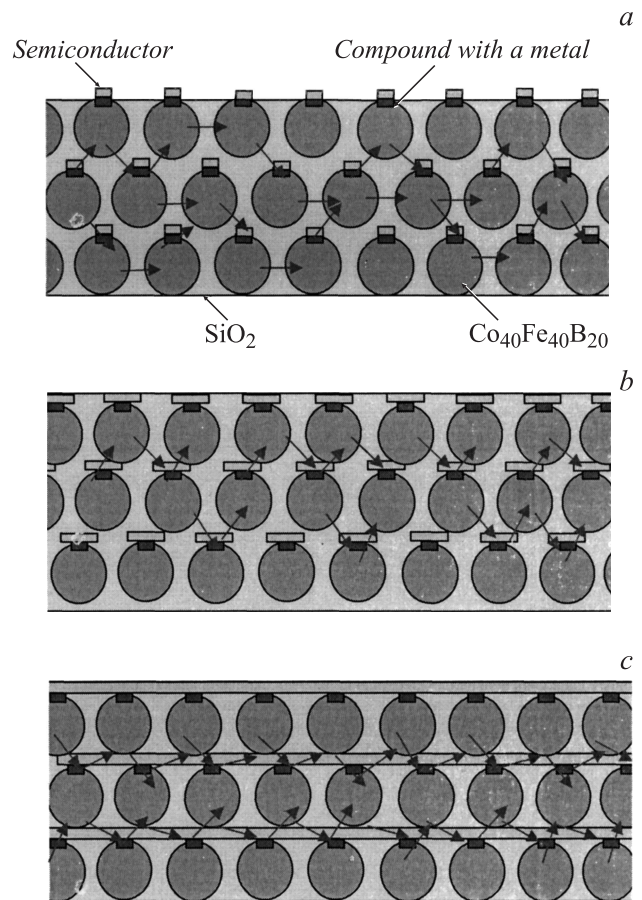


Рис. 5. Модельное представление о проводимости в многослойной пленке в зависимости от толщины полупроводникового слоя.

$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{C}]\}_{46}$. На графике $\rho(h)$ (рис. 3, a) можно выделить три участка. Так, при увеличении толщины прослойки до 1 nm электрическое сопротивление меняется незначительно. В интервале толщин прослойки углерода $h = 1 - 1.6$ nm наблюдается резкий спад, и электрическое сопротивление уменьшается на 3 порядка величины. Дальнейшее увеличение толщины прослойки практически не изменяет величину электрического сопротивления гетерогенной системы. Подобные закономерности наблюдались и для многослойной структуры $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65} / \alpha\text{-Si:H}]\}_{30}$ [5].

На всех исследованных зависимостях удельного электрического сопротивления многослойных структур этой группы наблюдается достаточно узкий диапазон толщин прослойки полупроводника, в котором наблюдается значительное (на несколько порядков) изменение $\rho(h)$. Именно в этом диапазоне наступает упорядочение магнитных моментов гранул композиционных слоев пленок, проявляющееся в возрастании величин действительной и мнимой частей комплексной магнитной проницаемости (рис. 3, b).

Если в качестве прослойки между суперпарамагнитными слоями взять металл с хорошей проводимостью,

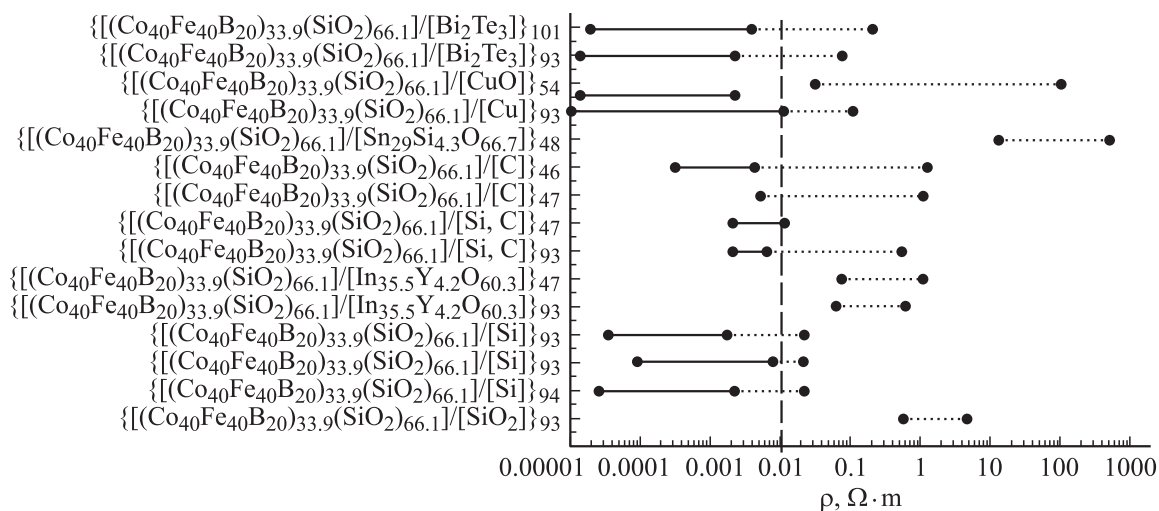


Рис. 6. Магнитные состояния различных многослойных структур в зависимости от их удельного электрического сопротивления. Штриховая линия показывает величину удельного электрического сопротивления чистого композита $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{33.9}(SiO_2)_{66.1}$, точечные линии — суперпарамагнитное состояние, сплошные линии — магнитоупорядоченное состояние.

то наблюдаемые закономерности формирования магнитного упорядочения магнитных моментов гранул проявляются и в этом случае (рис. 4).

Для объяснения установленных закономерностей рассмотрим последовательность роста полупроводниковой прослойки в пленке (рис. 5). Используя принцип минимизации поверхностной энергии структуры в процессе роста, можно предположить, что зародыши пленки полупроводника на поверхности композита будут концентрироваться на металлических гранулах. На начальной стадии роста островков полупроводника, когда их размер меньше площади поверхности выхода металлических гранул в интерфейсе композита, электроперенос возможен по двум каналам. Во-первых, как и в обычном композите — по каналу: гранула–диэлектрик–гранула. И во-вторых, образуется новая возможность электропереноса по каналу: гранула–полупроводник–диэлектрик–гранула (рис. 5, а). Второй путь движения электронов от гранулы к грануле является более вероятным и его роль увеличивается по мере роста толщины полупроводниковой прослойки. Образующаяся островковая структура слоя будет оказывать незначительное влияние на величину удельного электрического сопротивления до толщин, когда структура полупроводниковой пленки станет непрерывной на расстояниях, больших, чем межгранульное расстояние (рис. 5, б). В этом случае начинают формироваться каналы электропереноса гранула–прослойка–гранула, что приводит к резкому спаду величины удельного электрического сопротивления.

Кроме немонотонной зависимости $\rho(h)$ данные многослойные гетерогенные системы имеют необычные зависимости действительной и мнимой частей комплексной магнитной проницаемости от толщины немагнитной прослойки. Состав композита $[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{33.9}(SiO_2)_{66.1}]$ находится до порога протекания и его магнитные свойства определяются нескоррелированным в простран-

стве вектором намагниченности отдельных изолированных наноразмерных ферромагнитных гранул сплава $Co_{40}Fe_{40}B_{20}$ в аморфном состоянии. Данная магнитная структура по литературным источникам получила название суперпарамагнитной, так как кривая намагничивания описывается функцией Ланжевена [9]. Высоко-частотные свойства таких структур имеют невысокие значения μ' и μ'' , что мы и наблюдаем на графике 3, b для $\mu'(h)$ и $\mu''(h)$ до толщин прослоек меньше 1.2 nm. При дальнейшем увеличении толщины углеродного слоя возникает значительное увеличение действительной и мнимой частей комплексной магнитной проницаемости, что можно объяснить возникновением магнитного упорядочения векторов намагниченности ферромагнитных гранул. На начальной стадии этого процесса ансамбль ферромагнитных частиц за счет слабого магнитного взаимодействия между ними имеет достаточно высокую дисперсию локальных полей анизотропии, так как каждая отдельная гранула обладает своим направлением магнитной анизотропии. Такая магнитная структура будет обладать высокими значениями магнитных потерь в магнитных полях ВЧ-диапазона.

При дальнейшем увеличении толщины полупроводниковой прослойки магнитное взаимодействие между гранулами увеличивается, дисперсия локальных полей анизотропии уменьшается и, как следствие, величина μ'' становится незначительной в случае, если частота естественного ферромагнитного резонанса для пленки с данной магнитной структурой находится при значительно больших частотах, чем частота измерения.

В структурах с полупроводниковой прослойкой наблюдается явная корреляция магнитных и электрических свойств многослойных гетерогенных структур. Эта зависимость становится еще более наглядной при рассмотрении многослойной пленки, где в качестве немагнитной прослойки использовалась медь (рис. 4).

Таким образом, в рассматриваемых структурах, где в качестве прослоек выступают низкоомные полупроводники (Si, C, Bi₂Te₃) и металлы (Cu), в отличие от высокоомных полупроводников и диэлектриков (CuO, SiO₂, In_{35.5}Y_{4.2}O_{60.3}, Sn₂₉Si_{4.3}O_{66.7}), можно наблюдать глубокую вовлеченность полупроводниковых слоев в процесс проводимости. Рост толщины прослоек кардинальным образом сказывается на величине проводимости многослойной структуры в целом. Более того, по мере увеличения толщины прослойки в пленке возникает ферромагнитное упорядочение. Слои композита, бывшие в суперпарамагнитном состоянии, взаимодействуют через немагнитные прослойки, и пленка в целом намагничивается.

На основе данных, полученных при исследовании электрических и магнитных свойств многослойных структур, была получена диаграмма (рис. 6), устанавливающая общую для всех составов корреляцию магнитного упорядочения в образцах со значением их удельного сопротивления. При построении диаграммы учитывались результаты исследования всех партий.

Диаграмма наглядно показывает связь электрических свойств полупроводниковых прослоек и магнитных свойств многослойных структур в целом. Данные диаграммы позволяют судить о значительном влиянии количества носителей заряда на механизм появления магнитного упорядочения. Существует некое критическое значение удельного электрического сопротивления пленок (около 10⁻² Ω · m), ниже которого в них наблюдается магнитное упорядочение.

Это справедливо для всех видов исследуемых пленок и не зависит от состава прослоек. Даже если и образуются какие-либо соединения на границе раздела композит–полупроводник, их вклад в процесс магнитного упорядочения незначителен. Главным в нем остается влияние определяющих проводимость носителей заряда в прослойке. Полученные результаты можно связать с возникновением косвенного обменного взаимодействия между изолированными ферромагнитными гранулами сплава Co₄₀Fe₄₀B₂₀ через электроны проводимости.

Заключение

Получены многослойные пленки суперпарамагнитного композита (Co₄₁Fe₃₉B₂₀)_{33.9}(SiO₂)_{66.1} с прослойками девяти различных составов нанометровой толщины. Исследованы зависимости удельного электрического сопротивления полученных многослойных структур от параметров слоев. Установлено, что для гетеросистем

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Si}]\}_{94},$$

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{C}]\}_{46},$$

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Cu}]\}_{93},$$

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Bi}_2\text{Te}_3]\}_{101}$$

удельное электрическое сопротивление снижается на 3–4 порядка при наличии сплошного слоя прослойки, что связывается с влиянием на электроперенос прослойки, имеющей более низкое электрическое сопротивление. В гетерогенных системах

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{SiO}_2]\}_{93},$$

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Sn}_{29}\text{Si}_{4.3}\text{O}_{66.7}]\}_{48},$$

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{In}_{35.5}\text{Y}_{4.2}\text{O}_{60.3}]\}_{47},$$

у которых величина удельного электрического сопротивления сравнима с удельным электрическим сопротивлением матрицы композита, влияние толщины прослойки более сложное: на зависимости $\rho(h)$ наблюдается минимум.

Изучены зависимости действительной и мнимой частей комплексной магнитной проницаемости многослойных пленок суперпарамагнитного композита (Co₄₁Fe₃₉B₂₀)_{33.9}(SiO₂)_{66.1} с прослойками различных составов от толщины слоев на частоте 50 МГц. Установлено, что в исследуемых гетерогенных системах при образовании сплошного слоя прослойки и достижении удельного электрического сопротивления порядка 10⁻² Ω · m происходит переход от суперпарамагнитного состояния к ферромагнитному упорядочению. Полученные результаты связываются с возникновением косвенного обменного взаимодействия между изолированными ферромагнитными гранулами сплава Co₄₁Fe₃₉B₂₀ через электроны проводимости прослойки.

Полученные многослойные гетерогенные структуры

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Si}]\}_{94},$$

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{C}]\}_{46},$$

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Cu}]\}_{93},$$

$$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}] / [\text{Bi}_2\text{Te}_3]\}_{101}$$

являются перспективными материалами для использования в ВЧ- и СВЧ-функциональных устройствах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-02-97511 р-центра-а.

Список литературы

- [1] Gareev R.R., Bürgler D.E., Buchmeier M., Olligs D., Schreiber R., Grünberg P. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 87. P. 157–202.
- [2] Burgler M., Buchmeier M., Gramm S., Eisebitt S., Gareev R.R., Grünberg P., Jial C.L., Pohlmann L.L., Schreiber R., Siegel M., Qin Y.L., Zimina A. // J. Phys. Condens. Matter. 2003. Vol. 15. P. 443–450.
- [3] Васильковский В.О., Патрин Г.С., Великанов Д.А., Свалов А.В., Савин П.А., Ювченко А.А., Щеголева Н.Н. // ФТТ. 2007. Т. 49. № 2. С. 291–296.
- [4] Белоусов В.А., Калинин Ю.Е., Королев К.Г., Ситников А.В., Ситников К.А. // Вестник ВГТУ. 2006. Т. 2. № 11. С. 24–29.

- [5] *Иванов А.В., Калинин Ю.Е., Нечаев В.Н., Ситников А.В.* ФТТ. 2009. Т. 60. С. 2331–2336.
- [6] *Ганьшина Е.А., Перов Н.С., Пхонгхирун С., Мигунов В.Е., Калинин Ю.Е., Ситников А.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. № 10. С. 1455–1457.
- [7] *Ситников А.В.* // Альтернативная энергетика и экология. 2004. № 4. С. 28–30.
- [8] *Калаев В.А., Калинин Ю.Е., Нечаев В.Н., Ситников А.В.* // Вест. Воронежского гос. техн. ун-та. Сер. материаловедение. 2003. Вып. 1.13. С. 38–42.
- [9] *Гриднев С.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В.* Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 352 с.